

材料界面の摩擦・付着を考慮した 合成部材のせん断特性評価

B3TM6018 黒澤 明史

構造強度学研究室

2015年2月13日

研究背景

合成部材・複合構造

- ・ 複数の材料の特長を活かすことで効率化を図る
- ・ 材料間の力の伝達が重要



例：床版上のスタッドジベル

鋼桁橋

合成桁橋梁

スタッドジベルなどの機械的作用により、桁と床版の一体化を担保

非合成桁橋梁

桁と床版の一体的な挙動を期待しないが、実際には合成桁のような挙動を示す

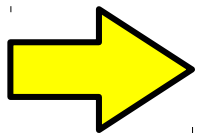
機械的作用だけでない合成作用？

合成に摩擦・付着が寄与している？

材料間の合成作用について

- 1960年の合成桁の設計指針（日本道路協会）
 - 付着力はあるが、設計に付着を利用してはならない。
- 非合成桁橋梁の床版-フランジ間について（山田ら 2001）
 - 付着により一体化がなされていると考察。
- 主桁-床版間の摩擦力に言及（多田ら 1962）
 - 摩擦力が合成作用へ影響することを指摘。

現在、摩擦・付着による一体化はまったく考慮されない。
しかし、一体化してしまっていることで、非合成連続桁の負曲げ部分でコンクリート床版に引張応力が発生することは周知…



合理的な設計のためには、
摩擦・付着を考慮した解析が必要。

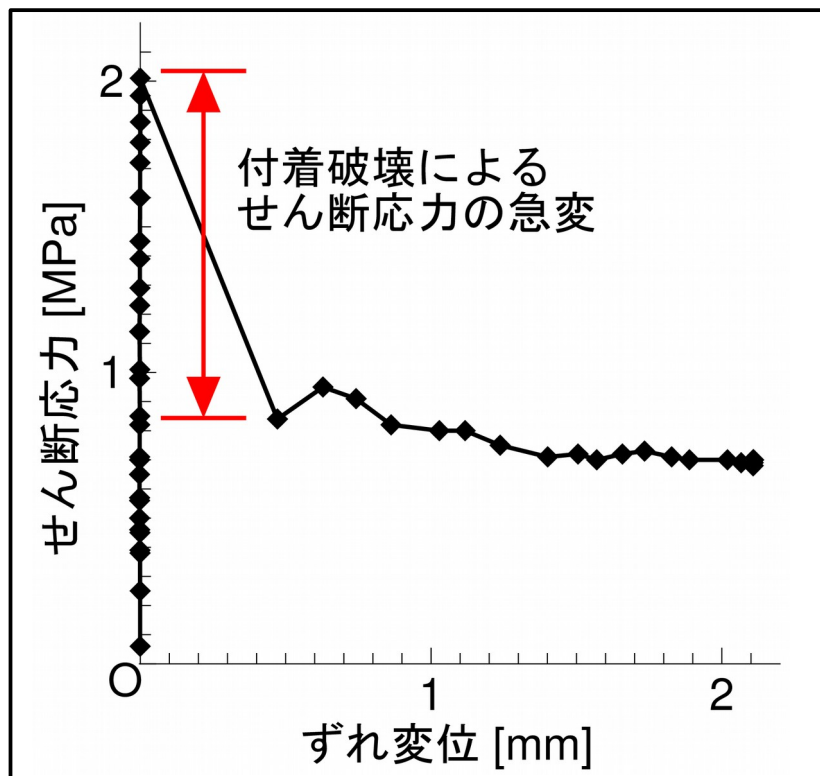
研究の目的と問題点

目的

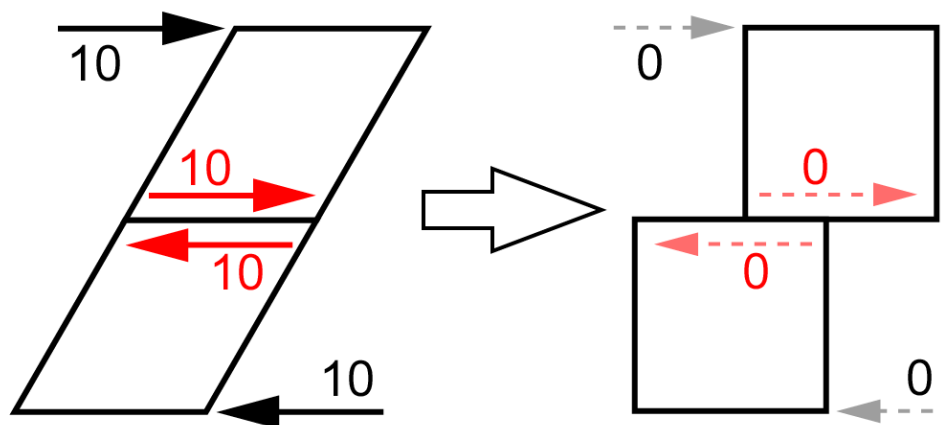
材料界面の摩擦・付着を考慮し、
合成部材のせん断特性を評価する。

ところが...

▼鋼-コンクリート界面の付着破壊実験



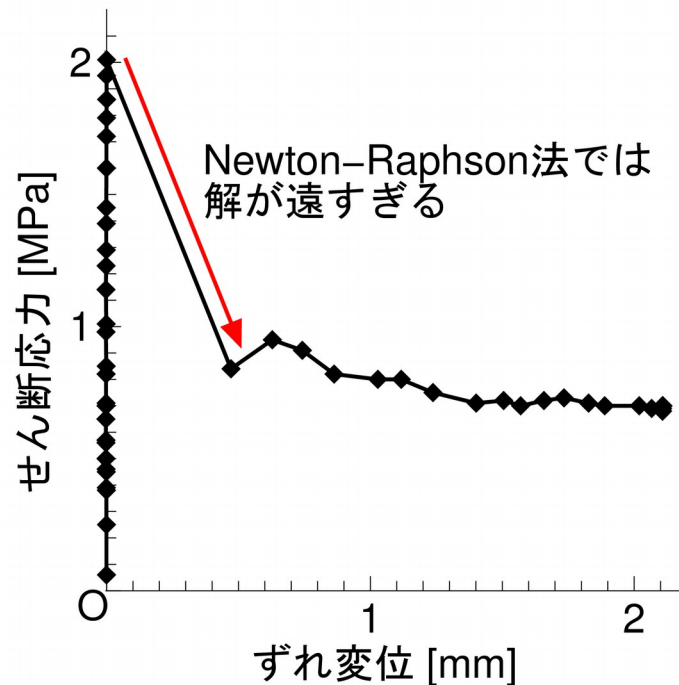
付着破壊現象は脆性的



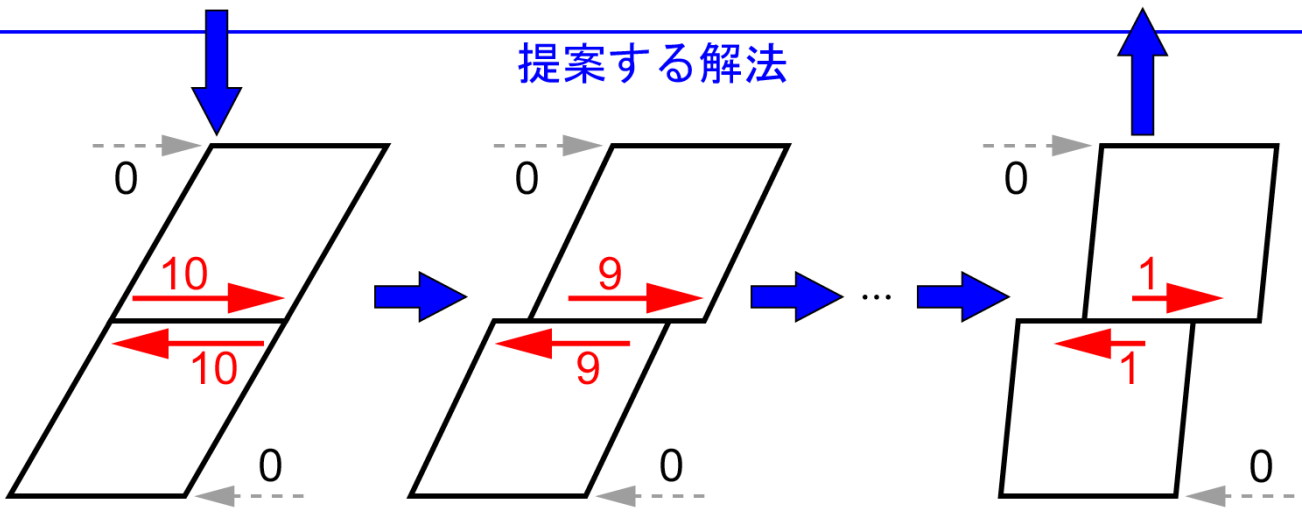
従来の方法では付着破壊の計算が困難

提案する解析手法の概念

力がいきなり10→0になる付着破壊の計算は困難



提案する解法



力が10→0になる間の架空の状態を仮定し、接触面で伝達している力を10→9→8→...→1→0と減少させ、段階を踏んで計算を行う。

解析方法・対象

解析プログラム

接触 + 弾塑性 有限要素解析

解析するモデル

- ・ 合成桁 (半解析モデル・周期境界)
- ・ スタッドの押抜きせん断 (1/4モデル)

接触について

節点間接触

接触解析: penalty法

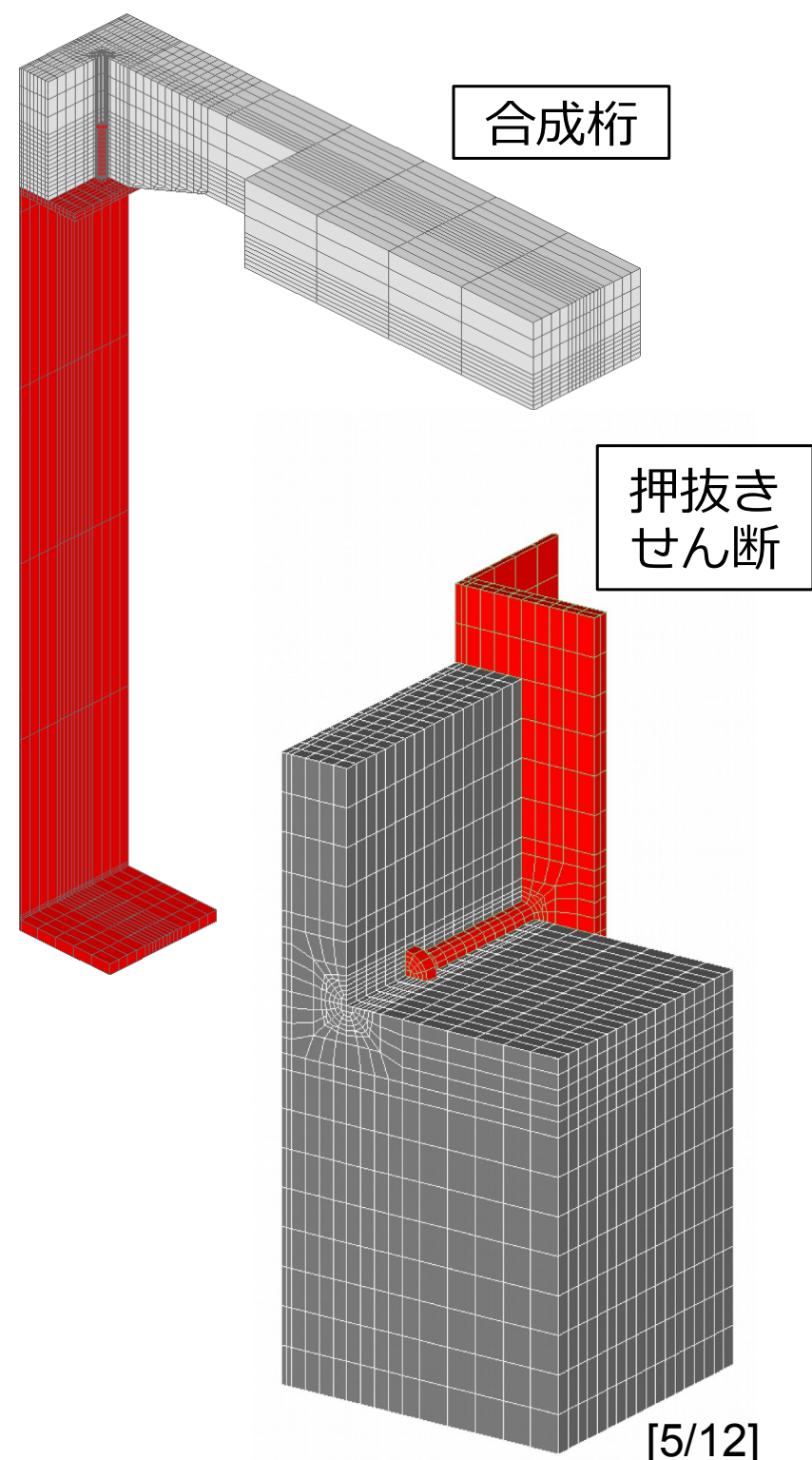
接触力の更新: return mapping法

摩擦・付着: Coulomb摩擦

降伏関数 = 接触力 - 摩擦力 - 付着力

↓ 付着破壊 (降伏関数 = 0)

降伏関数 = 接触力 - 摩擦力 - 0



解析方法・対象

鋼

弾完全塑性, von Misesの降伏条件

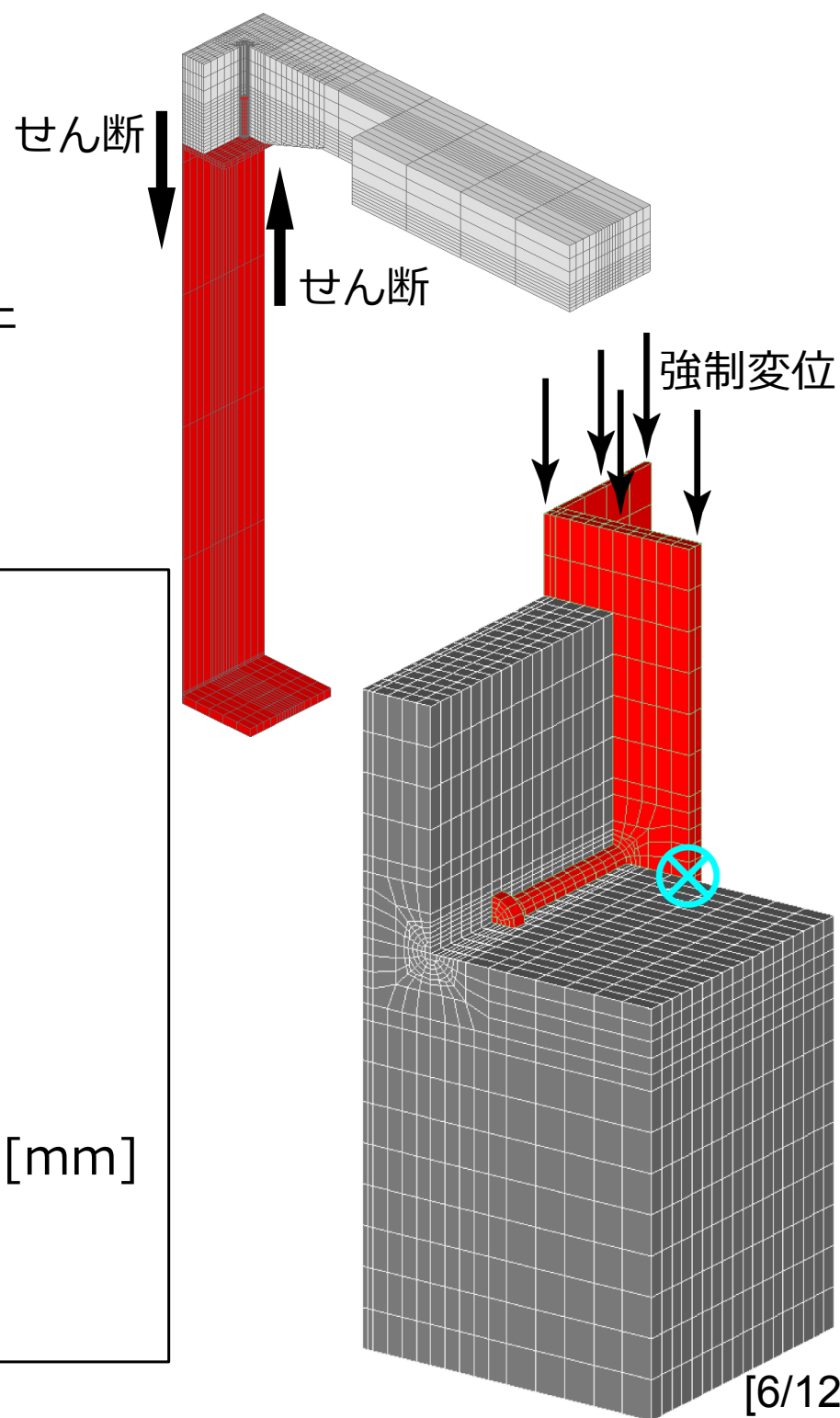
コンクリート

Drucker-Pragerの破壊基準

桁にせん断or鋼材に強制変位を与え,

- ・ 押抜き「荷重」 [kN] (押抜き試験のみ)
 - 鋼材天端の鉛直方向反力を合計
- ・ スタッドにかかる「せん断力」 [kN]
 - スタッドのせん断方向力を合計
- ・ 鋼材とコンクリートとの「ずれ変位」 [mm]

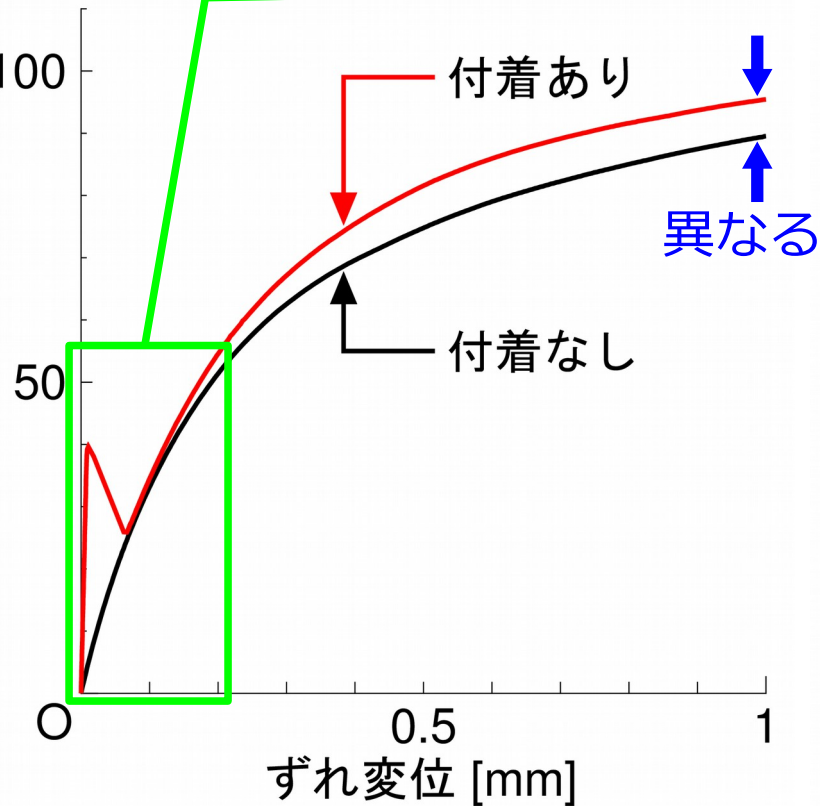
を計測.



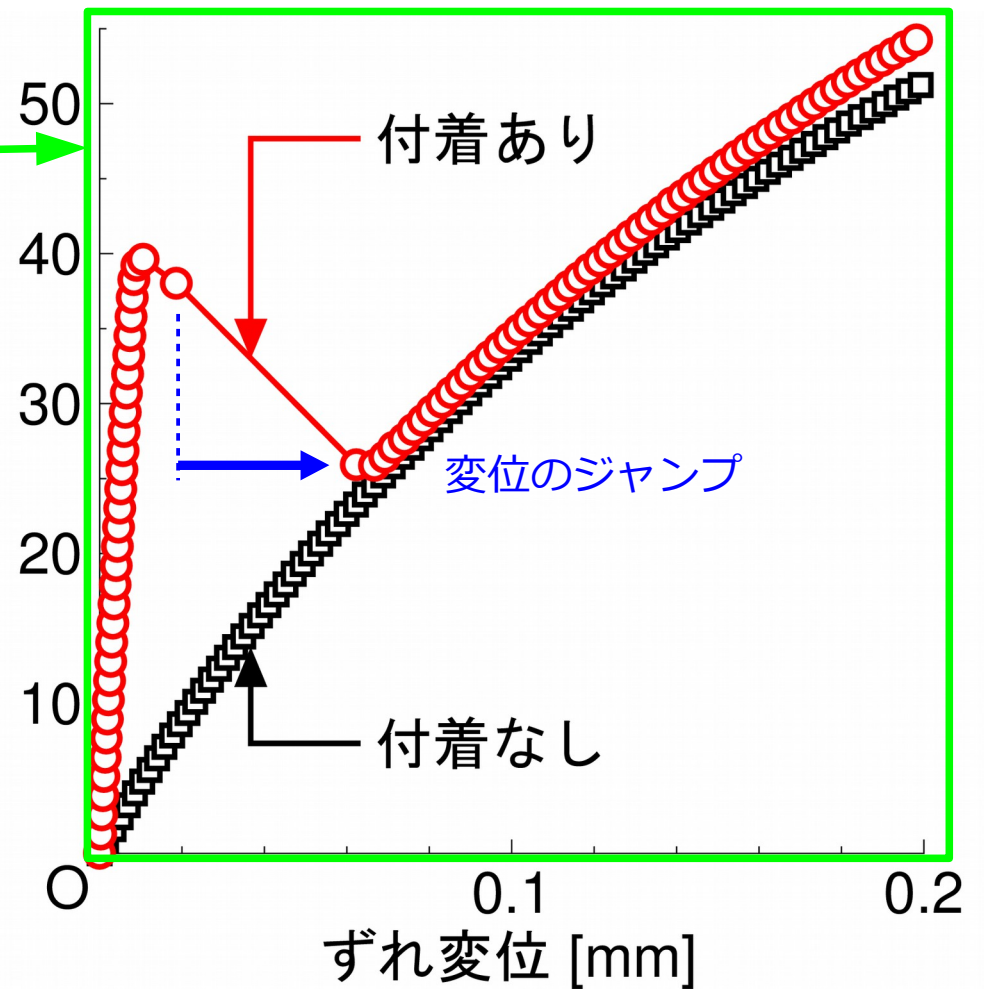
合成桁モデル

摩擦係数 0.5

スタッドせん断力+付着力 [kN]



スタッドせん断力+付着力 [kN]



摩擦係数0.5, 付着強度 0 または 1MPaの力-変位曲線

- ・ 付着があると力に極大点ができる。
- ・ 付着の有無により, 付着破壊後も力-変位曲線が変化する。

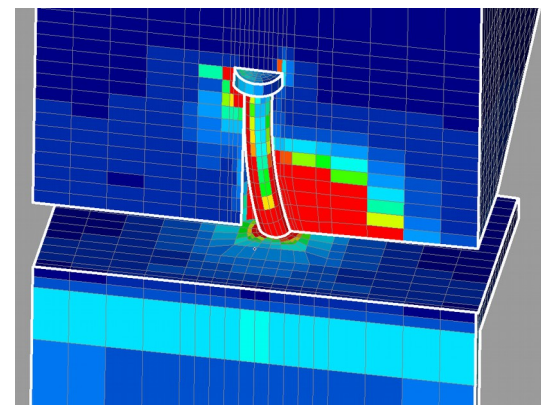
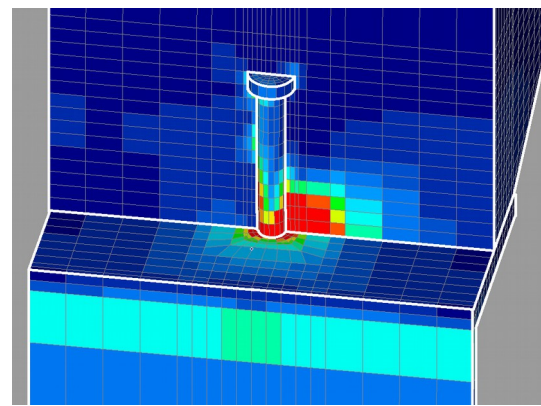
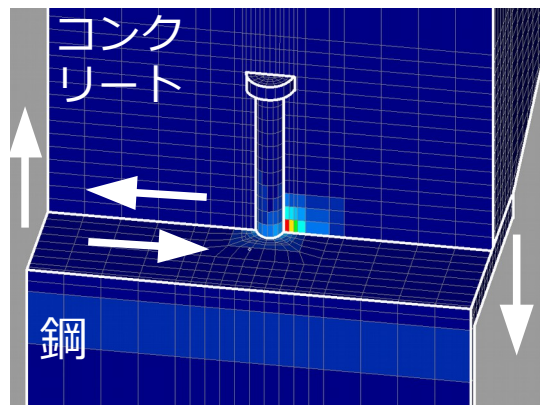
合成桁モデル

ひずみ分布 (ほぼ同じせん断力するとき)

摩擦係数
0.5

左・中 0.05%
右 0.2%

付着なし



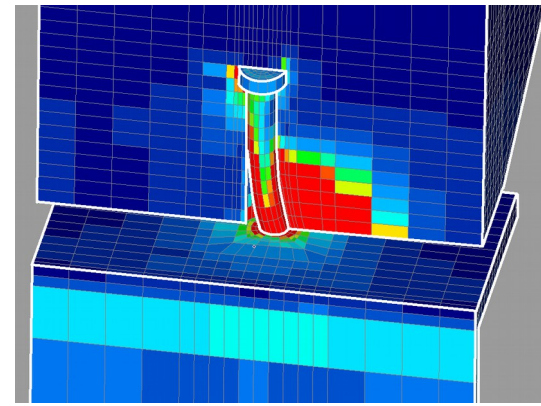
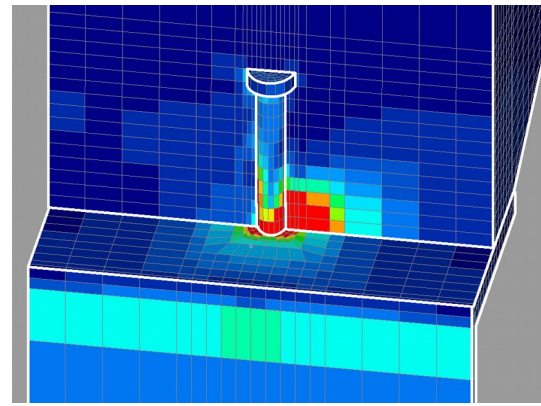
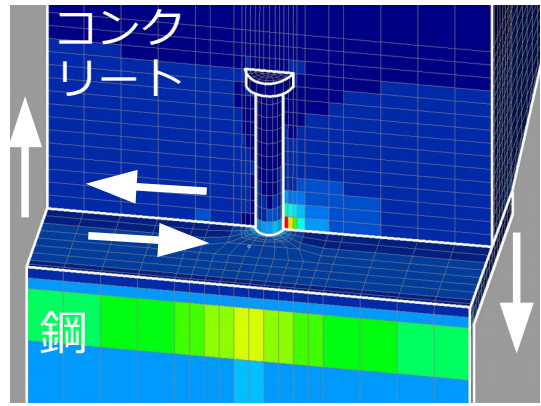
変形 ×10

付着破壊直前
(コンター上限0.05%)

付着破壊直後
(コンター上限0.05%)

ずれ変位大
(コンター上限0.2%)

付着あり



相当ひずみ

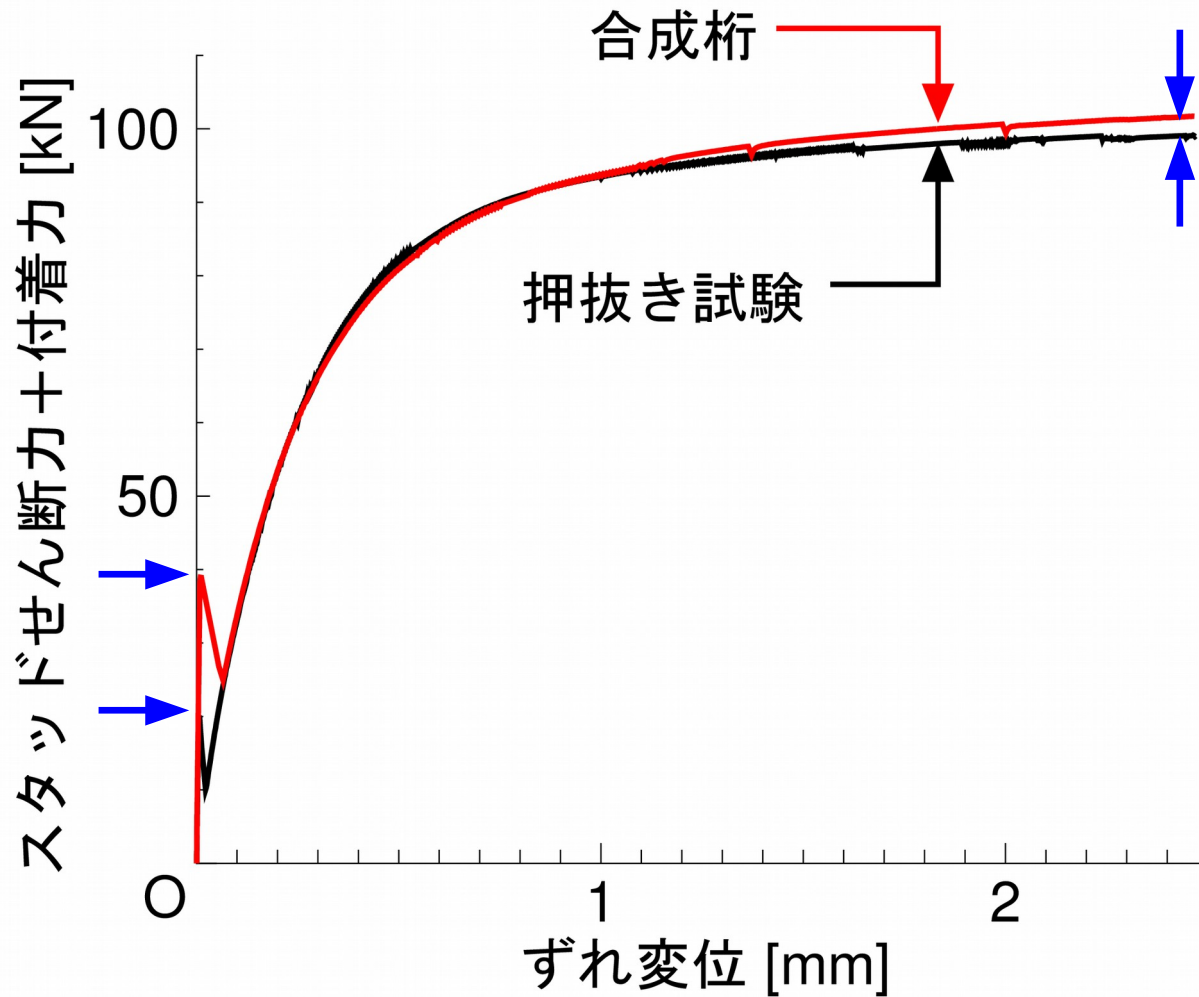
0%

- ・スタッド基部にひずみが集中
- ・付着ありでは界面全体にひずみ

- ・付着がなくなつて、ほぼ同じひずみ分布.

- ・付着なしではスタッド頭部のひずみが大きい.

合成桁と押抜き試験の比較



摩擦係数 0.0
付着強度 1MPa

- ・カ-ずれ変位関係は, ずれ変位が1mmを超えた付近から合成桁モデルの方が大きくなった.
- ・荷重の極大値の違いはフランジの接触面積の違いによる.

押抜きと合成桁の付着破壊の進展

摩擦係数 0.0, 付着強度 1.0MPa

合成桁
モデル

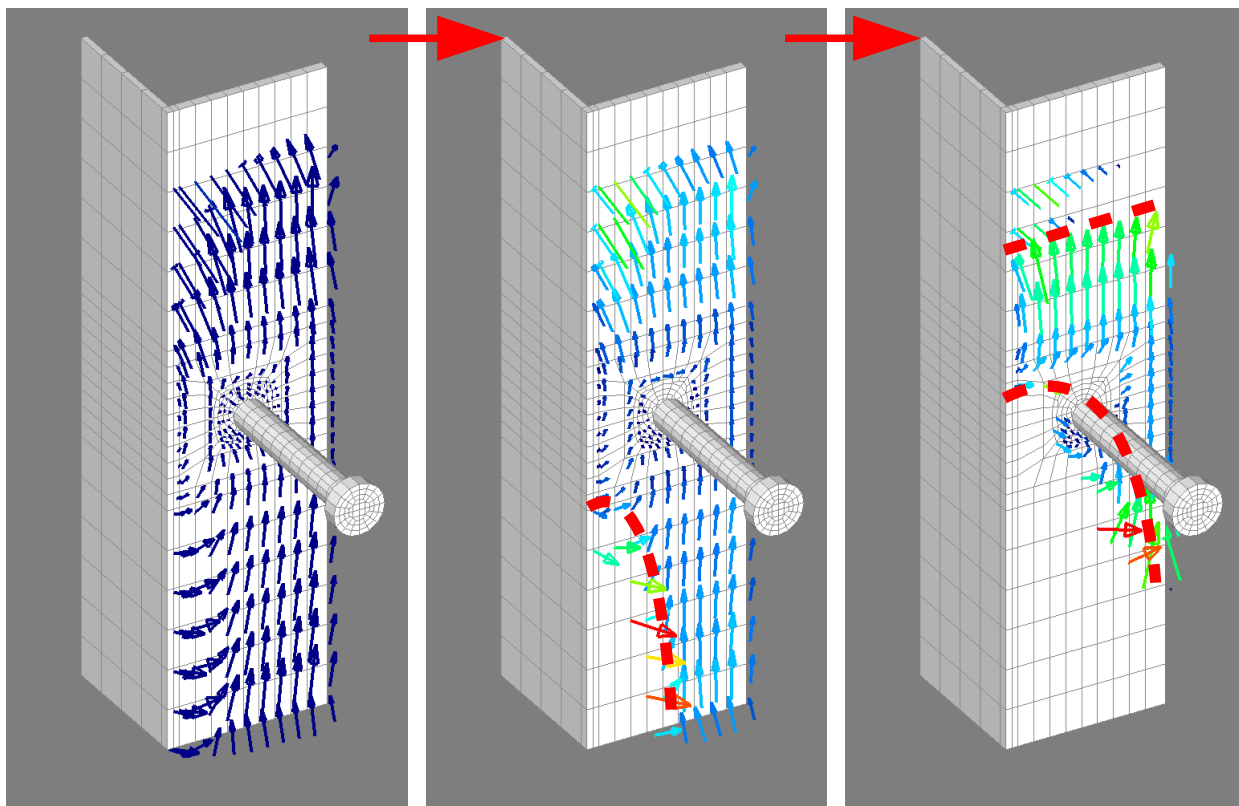
押抜き試験…鋼材下端から上の方に進展

合成桁…フランジ中心から外側へ

→ 押抜き試験と合成桁とは異なる

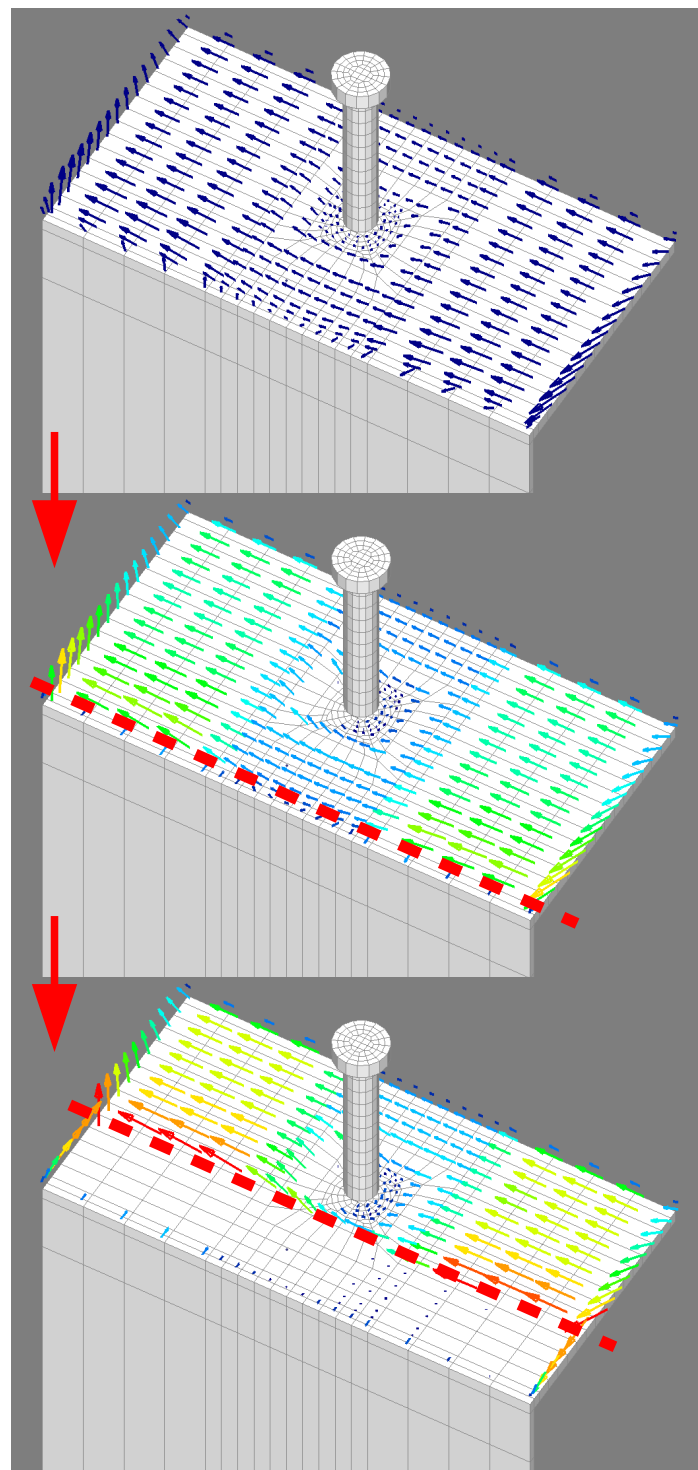
押抜き試験モデル

矢印は接触力の向き。
力の大きさを色で表示。



大
接触力

0



押抜きと合成桁とのひずみの比較

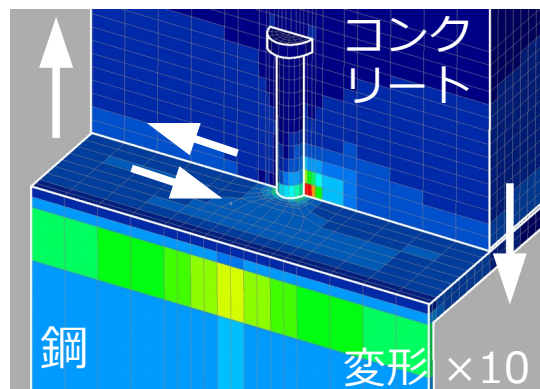
摩擦係数 0.0, 付着強度 1.0MPa

(ほぼ同じせん断力するとき)

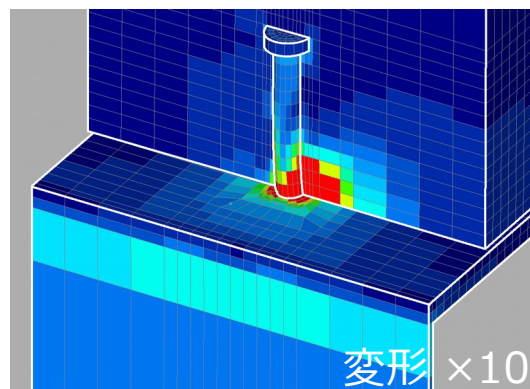
左・中 0.05%
右 0.2%



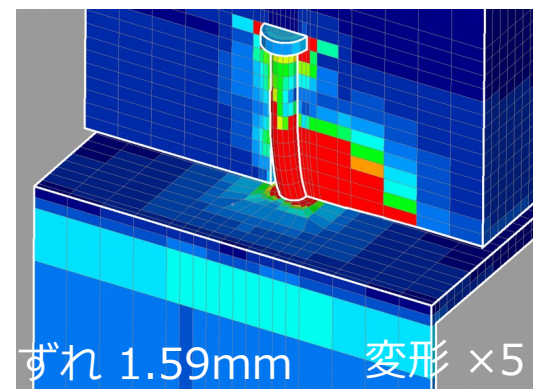
合成桁



付着破壊直前
(コンター上限0.05%)

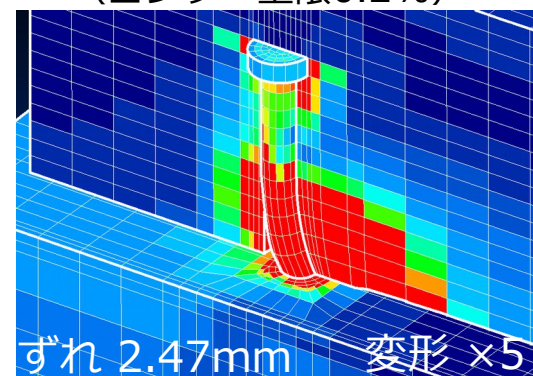
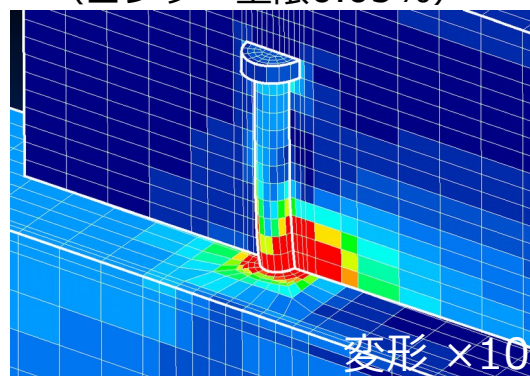
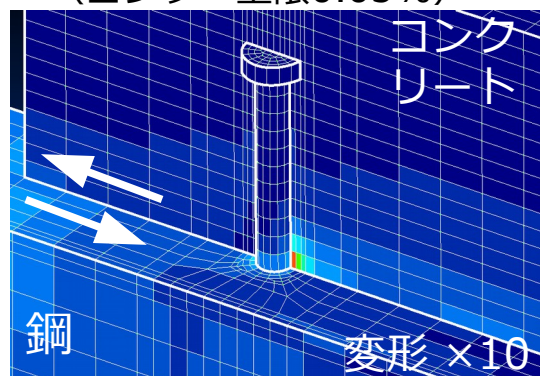


付着破壊直後
(コンター上限0.05%)



ずれ変位大
(コンター上限0.2%)

押抜き



- ・スタッド基部にひずみが集中
- ・付着により界面全体にひずみ

- ・押抜きではより広い範囲にひずみが分布している。

- ・押抜き試験ではスタッド前部にも大きなひずみが発生する。

まとめ

材料界面の摩擦・付着を考慮して合成部材のせん断特性を評価するにあたり、付着破壊の追跡が可能な解法を提案し解析を行った。

- ・ 付着破壊を再現して合成部材のせん断特性を評価できた。
- ・ 鋼コンクリート界面での付着破壊の進展は、合成桁モデルと押抜き試験モデルとで異なることがわかった。
- ・ 付着の有無によって付着破壊後も力-変位関係が異なり、付着が合成部材のせん断特性に影響を及ぼすことがわかった。

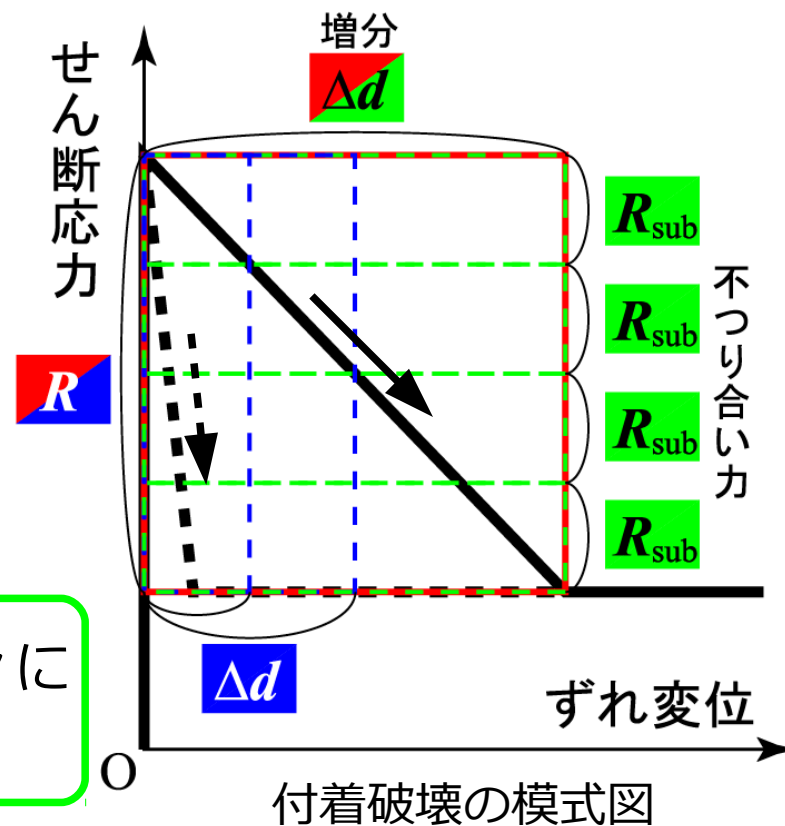
structural mechanics

提案する解析手法

通常通りに増分を与えては、付着破壊による不釣り合い力が大きすぎて収束できない。

増分を小さくしても付着破壊が発生し、不釣り合い力は収束できない。

増分を小さくしなくても、不釣り合い力を段々につり合わせていけば、解けるのではないか。



→ 付着破壊がある増分では n_{sub} 段階で収束を目指す。

$$\text{解消したい不釣り合い力 } R = \overset{\text{(外力)} - \text{(内力)}}{F_{\text{ext}} - F_{\text{int}}}$$

第 i_{sub} 段階で解消する不釣り合い力

$$R_{\text{sub}} = \overset{\text{前回収束時の外力}}{F_{\text{ext}}} - \overset{\text{前回収束時の内力}}{F_{\text{int}}} - \frac{n_{\text{sub}} - i_{\text{sub}}}{n_{\text{sub}}} R$$

前回収束時の外力・内力

Newton-Raphson法で
 R_{sub} を 0 に。

提案する手法

